

УДК 636.2.034:519.87

*В. О. КИТИКОВ, Е. В. ТЕРНОВ*

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ЛАКТАЦИОННЫХ КРИВЫХ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО  
ПЛАНИРОВАНИЯ ВАЛОВОГО ПРОИЗВОДСТВА МОЛОКА**

*Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства*

*(Поступила в редакцию 27.10.2009)*

Начиная со второй половины XX столетия достоянием мировой зоотехнической науки и практики стало ведение зоотехнического учета и производство молока промышленными способами с применением компьютерных технологий, аналитических математических моделей лактационных кривых коров, способов моделирования производственной деятельности молочно-товарных ферм на основе аппроксимации первичных производственных данных с учетом фактора времени суток при доении [1], индивидуальных надоев коров и производственных рисков [2]. Вместе с тем идея применения математических моделей лактационных кривых в планировании и экономической оценке производства молока, планировании оборота стада [3] в научных публикациях не прослеживается. В то же время простота программно-технической реализации и применения такого решения на современном уровне развития индустрии компьютерных технологий вполне очевидна и представляется целесообразной.

В практике молочного животноводства Республики Беларусь и Российской Федерации, несмотря на возрастающую оснащенность ферм автоматизированными системами управления стадом с индивидуальным компьютерным учетом надоев, расчет планов производства молока повсеместно выполняется вручную с использованием вспомогательных средств вычислений (калькуляторов, электронных таблиц Excel). Способы планирования валового производства молока, предназначенные для механизированных вычислений (с использованием калькулятора), базируются на производственных зоотехнических данных основных документов по учету молочной продуктивности и оперируют среднесуточными надоями коров за порядковый месяц лактации, рассчитанными по стаду или группе [4–6]. При этом результатом расчета является объем валового производства молока по месяцам планового года, следующего после отчетного. Для расчетов начало месяца лактации коровы увязывается с началом календарного месяца с точностью до 15 дней, а планирование надоев по стаду, зоотехническим группам и отдельным коровам предлагается выполнять по разным методикам [4, 6], при этом сезонный фактор, влияние которого на молочную отрасль требуется сводить к минимуму, в том числе и планированием валового производства молока, учитывается приближенно. Наконец, планирование уровня кормления по суточным надоям требует отдельного расчета надоев коровы в строгой привязке лактации к календарным датам. Таким образом, способы планирования производства молока, предназначенные для механизированных вычислений, при очевидной простоте алгоритма обладают следующими недостатками:

расчетный период ограничивается плановым календарным годом;

используются усредненные характеристики – суточный надой по месяцам лактации, продолжительность сухостойного периода, номер лактации, начало лактации в привязке к календарному месяцу;

точность результата снижается за счет методической погрешности;

не обеспечивается рациональное многократное использование результатов промежуточных вычислений.

Таким образом, задача автоматизации планирования валового производства молока с учетом разнообразных сопутствующих факторов и возможностью многоцелевого применения результатов промежуточных расчетов является достаточно актуальной. Современные технологии обработки данных с использованием программируемых выборок из базы данных позволяют организовать способ быстрого автоматического вычисления плана производства молока на основе индивидуальных модельных лактационных кривых каждой коровы, рассчитанных по экспериментальным данным индивидуального компьютерного учета надоев [7]. Преимуществами способа являются относительно несложная реализация в виде компьютерной программы, отсутствие ручных вычислений и операций предварительной подготовки данных (достаточно неукоснительного точного ведения компьютерного первичного зоотехнического учета), максимальный учет особенностей лактационной деятельности каждой конкретной коровы в стаде и высокая точность ее моделирования, произвольные временные границы расчетного периода и их независимость от производственных показателей отчетного года.

Планирование производства молока на промышленной основе с использованием такого способа рассматривается на примере молочно-товарного комплекса на 600 гол. для планового периода в 1 год.

Для исследования из базы данных автоматизированной системы управления стадом были отобраны индивидуальные надои коров за 120–305 дней с момента отела. Фактические лактационные кривые экстраполировались моделью Вуда (Wood, 1957), усовершенствованной авторами статьи (рис. 1):

$$y(t) = \begin{cases} a_1 t^2 + b_1 t + c_1, & 1 \leq t < t_{\max}, \\ at^b e^{-ct}, & t_{\max} \leq t \leq t_f, \end{cases} \quad (1)$$

где  $t_{\max}$  – день максимального надоя,  $t_f$  – последний день лактации,  $t = \overline{1, t_f, 1}$  – день лактации,  $y(t)$  – общий надой в день  $t$  с начала лактации, кг;  $a, b, c, a_1, b_1, c_1$  – индивидуальные параметры для каждой коровы.

Параметры модели (1) для каждой коровы и результаты расчета плановых надоев и валового производства молока по ферме сохранялись в БД MS Access. Для расчетов была составлена программа в среде Borland C++Builder 6.0 на основе блок-схемы алгоритма, представленной на рис. 2.

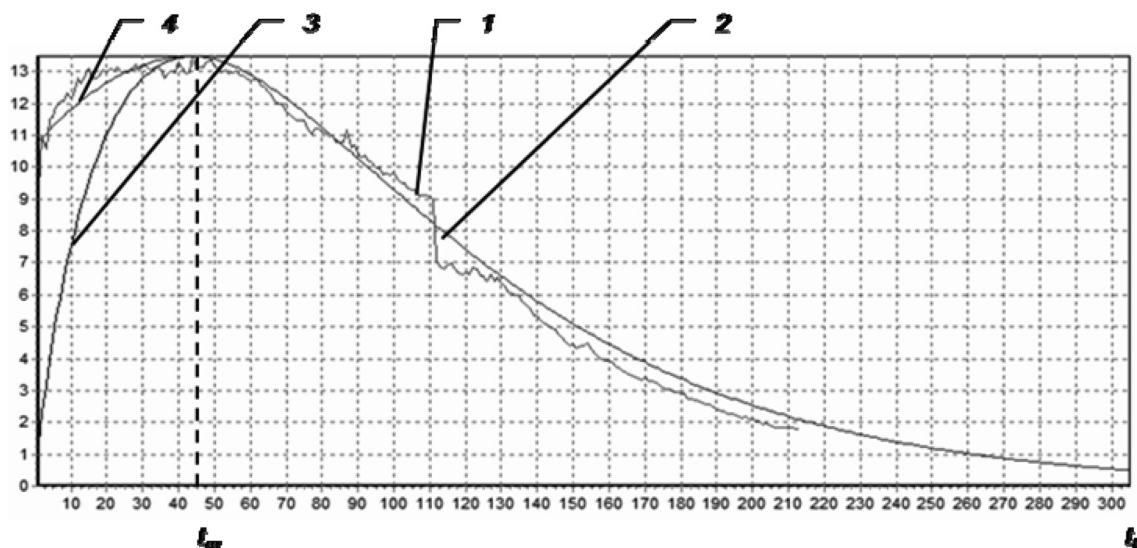


Рис. 1. Модель лактационной кривой коровы черно-пестрой породы: 1 – тренд лактационной кривой; 2 – модель Вуда после пикового надоя; 3 – модель Вуда до пикового надоя; 4 – замещение модели Вуда до пикового надоя параболой

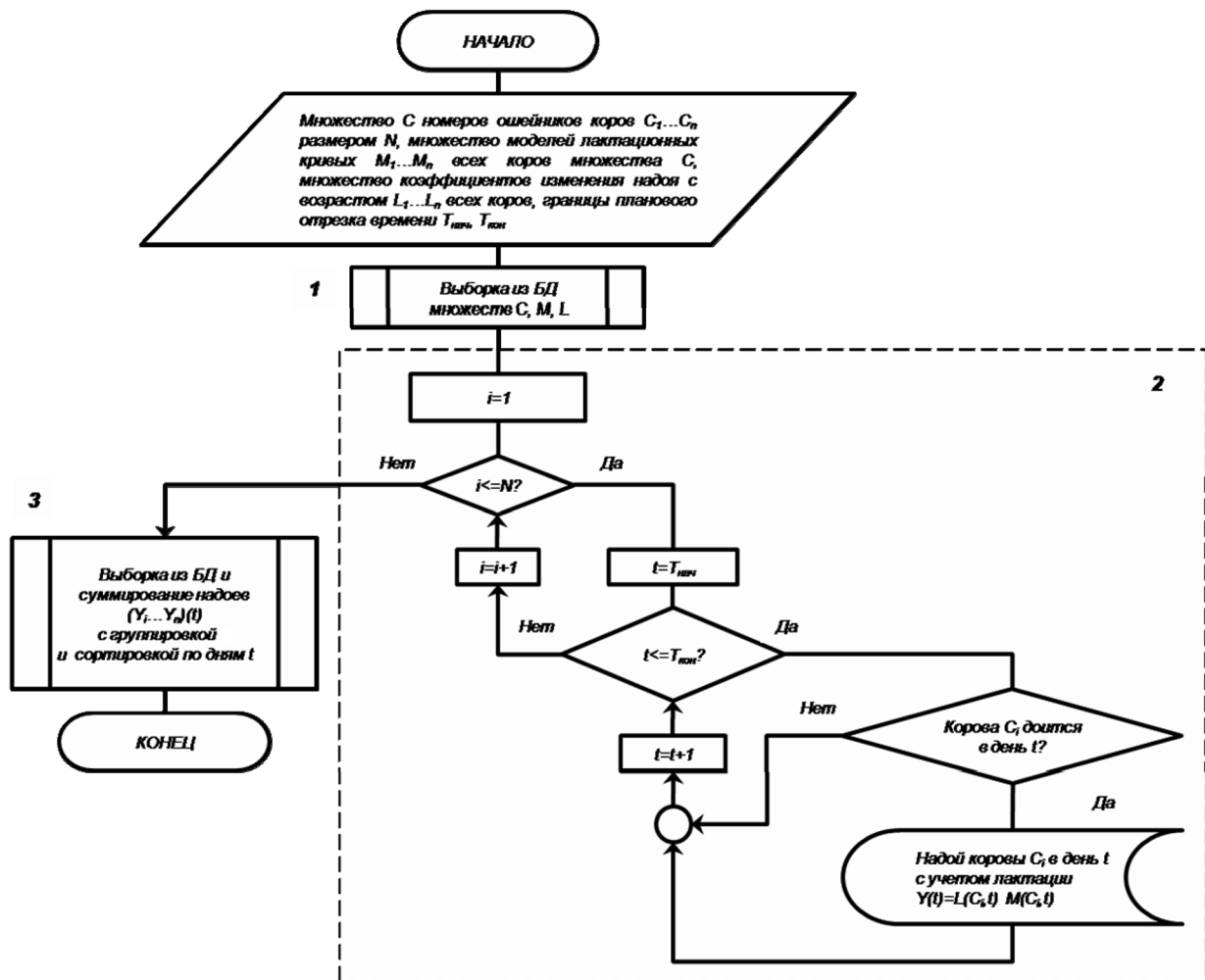


Рис. 2. Алгоритм машинного расчета плана производства молока

Шаг 1, с точки зрения технологии программирования, представляет собой выполнение единственного SQL-запроса к БД на выборку «**select ... where ...**», содержащего условие отбора коров. Запрос возвращает множество  $C$  номеров коров (далее – коров)  $C_1, \dots, C_n$  и связанных с ними параметров моделей лактационных кривых (1), номера лактаций, а также даты отелов и запусков в границах планового отрезка времени  $[T_{\text{нач}} T_{\text{кон}}]$ . Размер  $N$  множества  $C$  соответствует количеству строк, возвращенных запросом.

Шаг 2 представляет собой цикл вычислений  $\forall C_i \in C$  суточного надоя  $y(t) \forall t \in [T_{\text{нач}} T_{\text{кон}}]$ ; полученные значения  $y(t)$  сохраняются в БД. Вычислению надоев коровы  $C_i$  предшествует определение границ сухостойного периода  $[T_{\text{нач}}^{\text{сух}} T_{\text{кон}}^{\text{сух}}]$  в плановом отрезке  $[T_{\text{нач}} T_{\text{кон}}]$  и определение номера лактации и порядкового номера дня лактации  $\forall t \notin [T_{\text{нач}}^{\text{сух}} T_{\text{кон}}^{\text{сух}}]$  (рис. 3). Очевидно, что в зависимости от значений  $T_{\text{нач}}$  и  $T_{\text{кон}}$  по отношению к дням начала и завершения лактаций плановый отрезок может включать как несколько сухостойных периодов, так и ни одного.

Суточный надой  $y(t)$  в день  $t$ , приходящийся на лактацию  $I$ , определяется по отношению к модельной лактации  $L$  в формуле (1) как

$$y(t) = M(t)L_I^M, \quad (2)$$

где  $M(t)$  – модельный надой в день  $t$  по формуле (1) или иной модели лактационной кривой,  $L_I^M$  – коэффициент изменения удоя за лактацию  $I$  по отношению к лактации  $M$ . Последний вычисляется следующим образом:

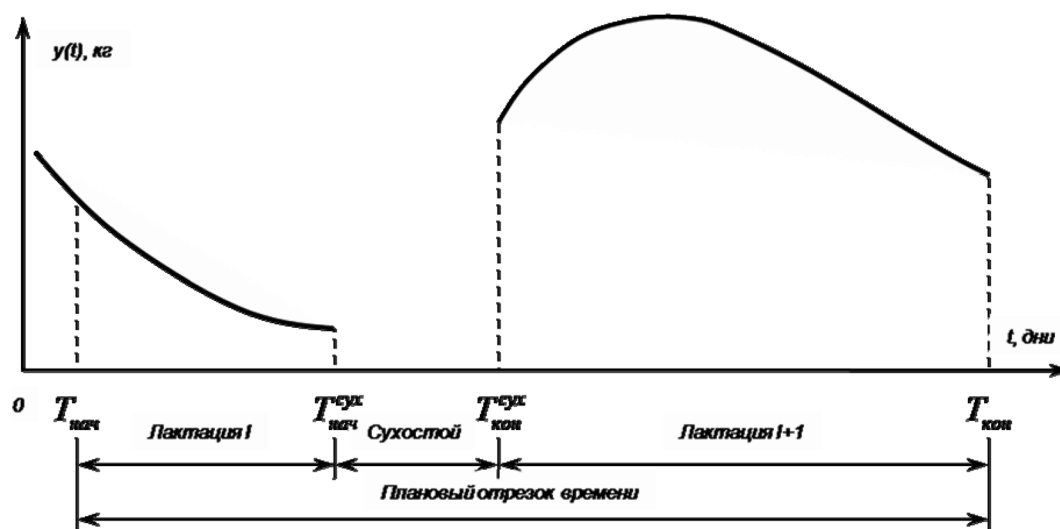


Рис. 3. Фрагменты соседних лактаций коровы в плановом отрезке времени

$$L_I^M = \begin{cases} \prod_{k=M+1}^I L_k^{k-1}, & M < I, \\ 1, & M = I, \\ \prod_{k=I+1}^M \frac{1}{L_k^{k-1}}, & M > I. \end{cases}$$

Приближенное значение коэффициента изменения удоя за лактацию по отношению к предыдущей лактации  $L_k^{k-1}$  может быть взято из табл. 1, полученной преобразованием процентов из методических указаний И. А. Хаканы [4, табл. 4], либо рассчитано по фактическим надоям для каждой коровы, зоотехнической группы или стада.

Таблица 1. Коэффициент изменения удоя за лактацию

|       |       |       |       |       |       |       |       |        |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 2 : 1 | 3 : 2 | 4 : 3 | 5 : 4 | 6 : 5 | 7 : 6 | 8 : 7 | 9 : 8 | 10 : 9 |
| 1,133 | 1,082 | 1,032 | 1,021 | 1,020 | 1,000 | 1,000 | 0,960 | 0,940  |

Шаг 3 в алгоритме расчета с точки зрения технологии программирования представляет собой выполнение SQL-запроса на выборку из БД суточных надоев  $Y$  (2), суммированных с группировкой по датам  $T$ , вида

**select T, sum(Y) as SY from <имя таблицы> group by T order by T,** (3)

где SY – суммарный надой всех коров в день  $T$ .

В соответствии с синтаксисом языка SQL в поле **where** запроса (3) может быть введено условие на ограничение по дате доения или по номерам коров. Запрос вида «**select sum(Y) as SY from <имя таблицы>**» возвратит величину суммарного надоя стада за плановый период.

Для оценки валового производства молока с точностью до одной смены при использовании модели (1) перед выполнением шага 3 каждый суточный надой (2) следует умножить на индивидуальный сменный коэффициент коровы  $C_1$ ,  $C_2$  или  $C_3$  соответственно 1-й, 2-й или 3-й смены:

$$\begin{cases} C_1 = \text{avg} \left( \frac{y(t)}{y_1(t)} \right), \\ C_2 = 1 - C_1 - C_3, \\ C_3 = \begin{cases} \text{avg} \left( \frac{y(t)}{y_3(t)} \right), & t \leq t_r, \\ 1 - C_1, & t > t_r, \end{cases} \end{cases}$$

где  $y_1(t)$ ,  $y_3(t)$  – надои дня  $t$  в 1-ю и 3-ю смены соответственно,  $t_r$  – номер с начала лактации последнего дня периода раздоя.

Можно также воспользоваться усредненными значениями из табл. 2, что будет полезно, в частности, при оценке вклада сменных надоев в суммарные суточные надои стада, полученные в результате выполнения запроса (3) или производных от него запросов.

Таблица 2. Относительный вклад надоев за смену в суточный надой

| Сменный коэффициент | По суточным надоям коровы |              | По суточным надоям стада |
|---------------------|---------------------------|--------------|--------------------------|
|                     | в период раздоя           | после раздоя |                          |
| $C_1$               | 0,47                      | 0,54         | 0,50                     |
| $C_2$               | 0,28                      | 0,00         | 0,18                     |
| $C_3$               | 0,25                      | 0,46         | 0,32                     |

Множество надоев (2), сохраненное в БД, является базовым для выполнения над ним разнообразных операций средствами языка SQL. Данный подход обеспечивает гибкость и технологичность программирования задач, требующих использования индивидуальных надоев коров в плановом отрезке времени, в частности, определения уровней кормления и информационного обеспечения процесса автоматизированной индивидуальной нормированной выдачи кормов.

Таким образом, предложенный метод реализуется в виде подпрограммы на алгоритмическом языке высокого уровня. Исходный код или динамическая библиотека на его основе может без переделки многократно использоваться в проектах по созданию программного обеспечения.

## Выводы

1. Предложенный способ позволяет спланировать валовое производство молока с точностью до одной дойки от любой календарной даты на произвольный отрезок времени (от одного дня до нескольких лет); в полной мере учитывать особенности лактационной деятельности каждой коровы на ферме; выполнить расчет для любого целевого подмножества стада; исключить переносы дат отелов и запусков на начало месяца; свести методическую погрешность расчета только к точности моделирования индивидуальных лактационных кривых коров; предельно точно смоделировать фактор сезонности производства; обеспечить автоматическое сохранение промежуточных результатов расчета (суточные и сменные надои каждой коровы во все дни планового отрезка) и в дальнейшем использовать их в других расчетах, в частности, в определении уровней кормления, визуальном представлении зоотехнику-селекционеру, составлении графика отелов, запусков и зооветеринарных мероприятий; применять разнообразные модели лактационных кривых для коров разных пород без изменения алгоритма расчета плана производства молока при условии единства структуры входных и выходных параметров для каждого вида моделей.

2. Способ может применяться в оптимизации планирования производства молока для расчета нескольких вариантов с целью выбора лучшего и планирования на его основе оборота стада. В данной связи новый способ дополнительно к вышеизложенным возможностям позволяет моделировать варианты введения первотелок и выбраковки введением в расчет виртуальных коров;

учитывать в расчетах математические модели климатических, технологических и иных факторов, влияющих на производство молока, с точностью до одной коровы и одной дойки.

3. Способ может быть применен для различных видов молочного скота с учетом особенностей математического моделирования их лактационной деятельности.

### Литература

1. B e r r y, D. P. Accuracy of predicting milk yield from alternative milk recording schemes / D. P. Berry [et al.] // *Animal Science*. – 2005. – Vol. 80. – P. 53–60.
2. D e L o r e n z o, M. A. Dairy Records and Models for Economic and Financial Planning / M. A. DeLorenzo, C. V. Thomas // *Journal of Dairy Science*. – 1996. – Vol. 79, N 2. – P. 337–345.
3. Т р о ф и м о в, А. А. Моделирование оборота стада крупного рогатого скота и оптимальное планирование производства в агрохозяйстве / А. А. Трофимов, И. В. Чугин // *Проблемы информационной экономики*. Вып. VI. Моделирование инновационных процессов и экономической динамики: сб. науч. тр. [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: <http://www.econ.asu.ru/lib/sborn/model2006/pdf/14.pdf>. – Дата доступа: 16.09.2009.
4. Х а к а н а, И. А. Методические указания к лабораторно-практическим занятиям по курсу «Скотоводство» / И. А. Хакана [Электронный ресурс]. – Петрозаводский гос. у-т, 2000. – Режим доступа: [http://window.edu.ru/window\\_catalog/files/t28033/petrsu015.pdf](http://window.edu.ru/window_catalog/files/t28033/petrsu015.pdf). – Дата доступа: 24.04.2008.
5. Т е р н о в ы х, К. С. Планирование производственной программы животноводства / К. С. Терновых [Электронный ресурс]. – Сайт ООО «ЦентрПрограммСистем», г. Белгород. – Режим доступа: <http://www.lcps.ru/stat4.html>. – Дата доступа: 07.09.2009.
6. Ш л я х т у н о в, В. И. Скотоводство и технология производства молока и говядины: учеб. пособие / В. И. Шляхтунов. – Минск: Беларусь, 2005. – 390 с.
7. Т е р н о в, Е. В. Математическое моделирование индивидуальных лактаций коров по фактическим значениям суточных надоев и их применение в компьютерной системе управления стадом / Е. В. Тернов // *Автоматизация и информационное обеспечение производственных процессов в сельском хозяйстве: сб. докладов 10-й междунар. науч.-практ. конф., Углич, 16–17 сент. 2008 г. / ГНУ ВИМ Россельхозакадемии*. – М., 2008. – Ч. 1. – С. 409–414.

*V. O. KITIKOV, E. V. TERNOV*

### APPLICATION OF A SIMULATION MODEL OF LACTATION CURVES FOR EFFECTIVE PLANNING OF MILK PRODUCTION

### Summary

The method of precise planning of milk production on the basis of extrapolation of lactation curve of every cow in a herd is proposed. This method uses an improved Wood model. The result is a sum of cows' daily yields. The method is presented as a computer program, it allows the combination of different models of lactation curve, calculation for any herd within any timeframes, enables to take into consideration the influence of perturbing factors, ensures multipurpose application of intermediate results and can be applied for different breeds of dairy cattle.